

东南大学电工电子实验中心

实 验 报 告

课程名称: 电路实验

第 8 次实验

实验名称: 黑箱电路元件判别及参数测试
 院 (系): 电气工程学院 专 业: 电气工程及其自动化
 姓 名: 王皓冬 学 号: 16022627
 实 验 室: 103 室 实验组别: _____
 同组人员: 无 实验时间: 2023 年 12 月 25 日
 评定成绩: _____ 审阅教师: _____

一、实验目的

- (1) 运用欧姆定律和元件的阻抗特性解决实际问题。
- (2) 学会根据需要选择激励源的类型、设定频率的高低，简化测量过程、提高测量精度。
- (3) 尝试从分析任务要求着手，应用已经学习过的知识，寻找解决问题的方法；同时也希望 拓宽视野，体验解决问题方法的多样性。学习体验“分析任务-调查研究-设计电路-构建平台实验测试-总结分析”的科学研究方法

二、实验原理（预习报告内容，如无，则简述相关的理论知识点。）

在黑箱电路中，由三个元件构成的 Y/Δ 的网络结构。这三个元件分别可能是电阻、电容或者电感等单一元件且不会是同一种元件。采用实验测量的方法，通过测试判断“Y”、“ Δ ”型网络中各元件的性质，计算元件的参数。

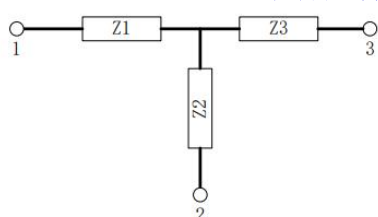


图1 黑箱电路“Y”型网络

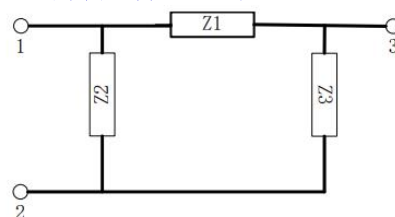


图2 黑箱电路“ Δ ”网络

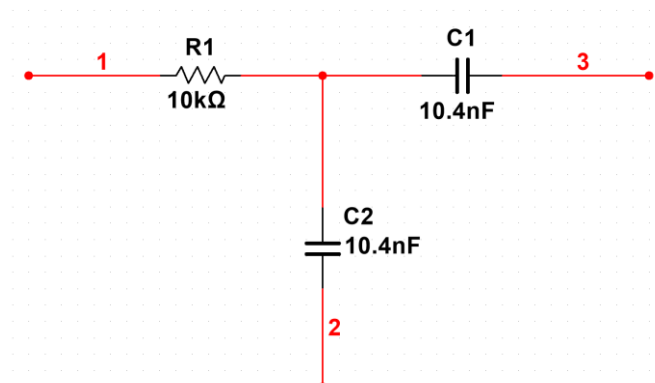
（ $Z1$ 、 $Z2$ 、 $Z3$ 为 R 、 L 、 C 中的某一元件且不会是同一种元件。）



- (1) 至少一个电阻条件下，枚举由 R 、 L 、 C 所有可能构成的“Y”型网络，分析每种可能网络各端口之间（1-2，2-3，1-3）的直流特性和交流特性（交流阻抗、幅度-频率，相位-频率）；

1. 仅一个电阻时

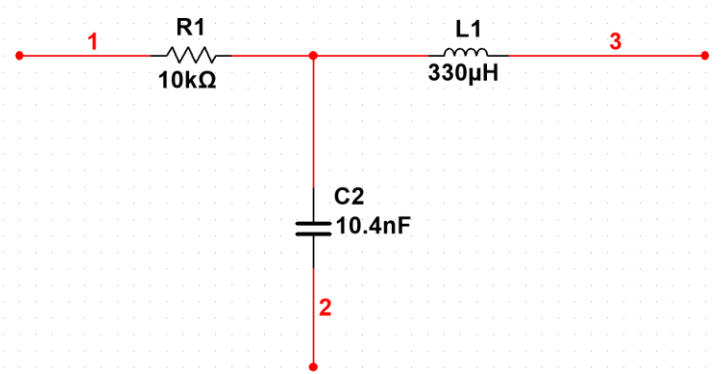
1.1 R-C-C



端口	直流特性	交流特性		
		交流阻抗	幅频	相频

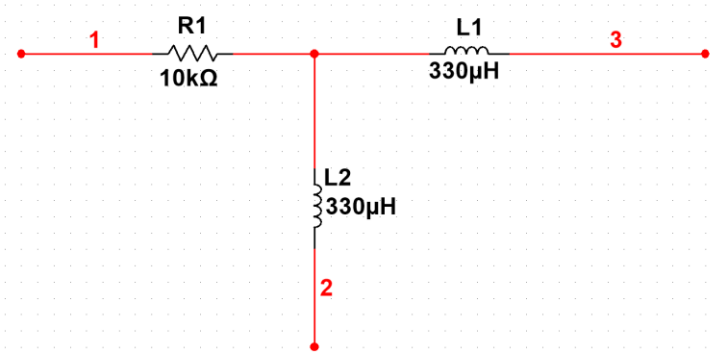
1、2	隔断	$\frac{1}{j\omega C_2}$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\frac{1}{\omega C_2})^2}}$	$\tan\theta = -\frac{1/\omega C_2}{R}$
1、3	隔断	$\frac{1}{j\omega C_1}$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\frac{1}{\omega C_1})^2}}$	$\tan\theta = -\frac{1/\omega C_1}{R}$
2、3	隔断	$\frac{1}{j\omega \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\frac{1}{\omega \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}})^2}}$	$\tan\theta = -\frac{1/\omega \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}{R}$

1.2 R-L-C



端口	直流特性	交流特性		
		交流阻抗	幅频	相频
1、2	隔断	$1/j\omega C$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}}$	$\tan\theta = -\frac{1/\omega C}{R}$
1、3	$U \propto \frac{1}{R}$	$j\omega L$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$	$\tan\theta = \frac{\omega L}{R}$
2、3	隔断	$\frac{1}{j\omega C} + j\omega L$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L}$	$\theta = \pm 90^\circ$

1.3 R-L-L

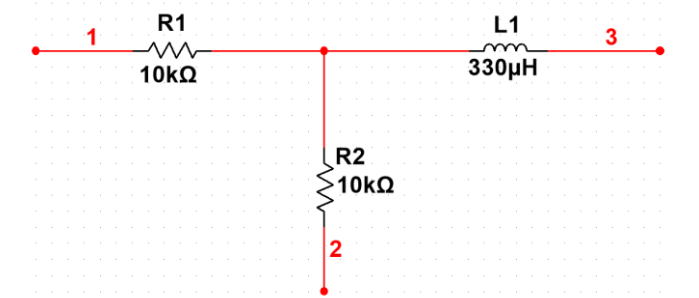


端口	直流特性	交流特性		
		交流阻抗	幅频	相频
1、2	$U \propto \frac{1}{R}$	$j\omega L_2$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega L_2)^2}}$	$\tan\theta = \frac{\omega L_2}{R}$

1、3	$U \propto \frac{1}{R}$	$j\omega L_1$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega L_1)^2}}$	$\tan\theta = \frac{\omega L_1}{R}$
2、3	$U = U_S$	$j\omega(L_1 + L_2)$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{j\omega(L_1 + L_2)}$	$\theta = 90^\circ$

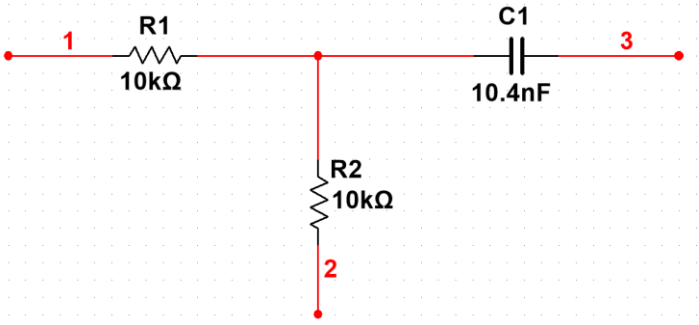
2. 两个电阻时

2.1 R-R-L



端口	直流特性	交流特性		
		交流阻抗	幅频	相频
1、2	$U \propto \frac{1}{R_1 + R_2}$	0	$ \dot{U} \propto \frac{1}{R_1 + R_2}$	$\tan\theta = 0^\circ$
1、3	$U \propto \frac{1}{R_1}$	$j\omega L$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}}$	$\tan\theta = \frac{\omega L}{R_1}$
2、3	$U \propto \frac{1}{R_2}$	$j\omega L$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L)^2}}$	$\tan\theta = \frac{\omega L}{R_2}$

2.2 R-R-C



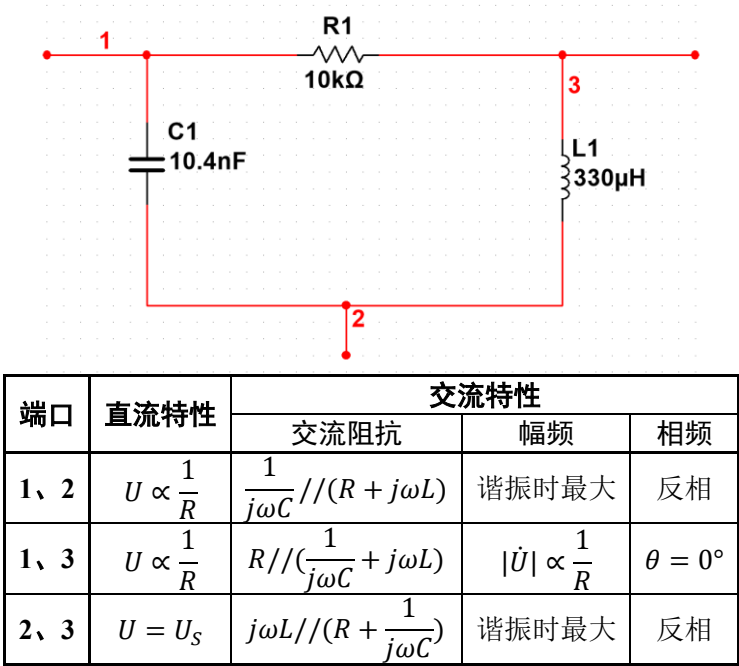
端口	直流特性	交流特性		
		交流阻抗	幅频	相频
1、2	$U \propto \frac{1}{R_1 + R_2}$	0	$ \dot{U} \propto \frac{1}{R_1 + R_2}$	$\tan\theta = 0^\circ$
1、3	隔断	$\frac{1}{j\omega C}$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (\frac{1}{\omega C})^2}}$	$\tan\theta = -\frac{\frac{1}{\omega C}}{R_1}$
2、3	隔断	$\frac{1}{j\omega C}$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R_2^2 + (\frac{1}{\omega C})^2}}$	$\tan\theta = -\frac{\frac{1}{\omega C}}{R_2}$

(2) 至少一个电阻条件下，枚举由 R、L、C 所有可能的“△”型网络，分析每种可

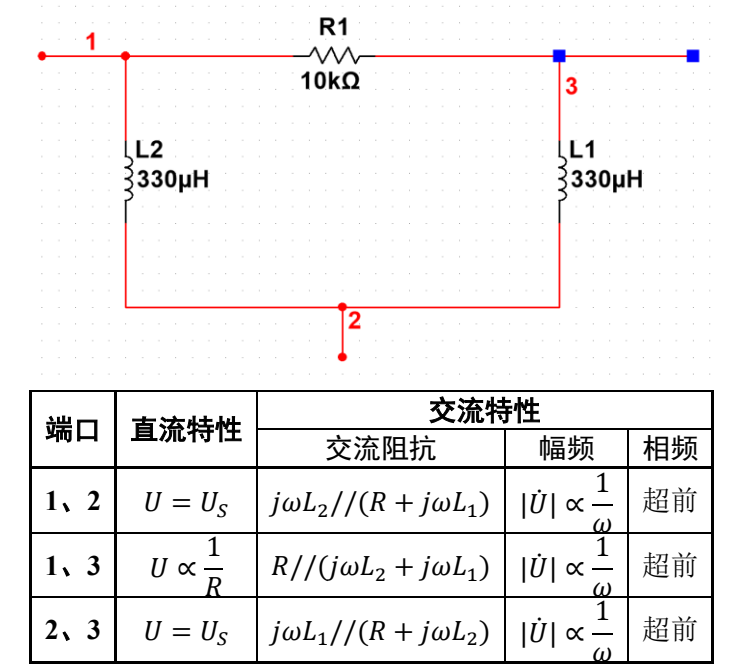
能网络各 端口之间（1-2，2-3，1-3）的直流特性和交流特性（交流阻抗、幅度-频率，相位-频率）；

1. 仅一个电阻时

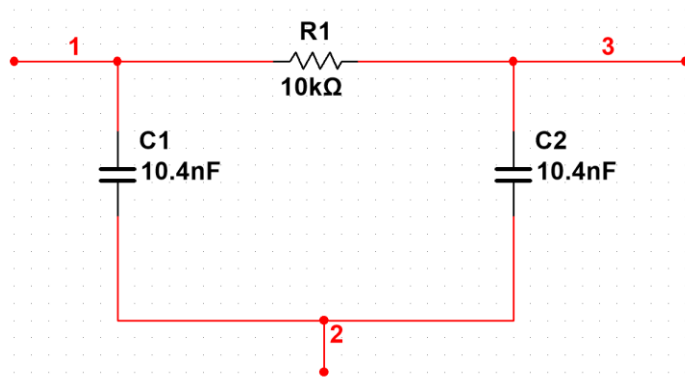
1.1 R-L-C



1.2 R-L-L



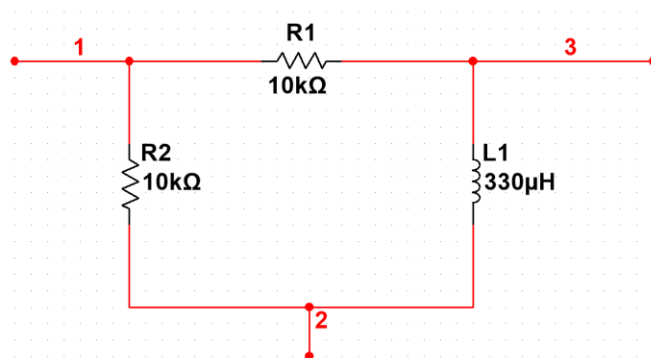
1.3 R-C-C



端口	直流特性	交流特性		
		交流阻抗	幅频	相频
1、2	断路	$\frac{1}{j\omega C_1} // (R + \frac{1}{j\omega C_2})$	$ \dot{U} \propto \omega$	滞后
1、3	$U \propto \frac{1}{R}$	$R // \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)}$	$ \dot{U} \propto \omega$	滞后
2、3	断路	$\frac{1}{j\omega C_2} // (R + \frac{1}{j\omega C_1})$	$ \dot{U} \propto \omega$	滞后

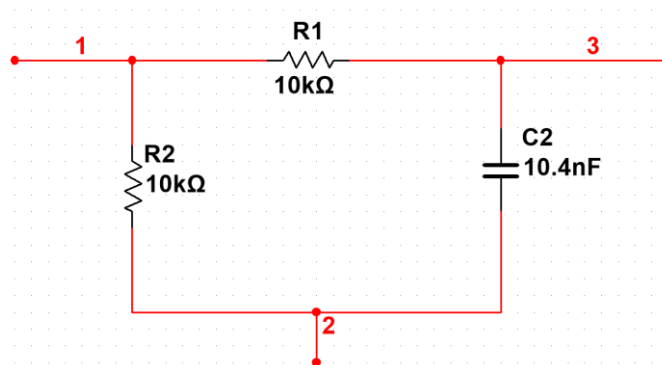
2. 两个电阻时

2.1 R-R-L



端口	直流特性	交流特性		
		交流阻抗	幅频	相频
1、2	$U \propto \frac{1}{R_2}$	$R_2 // (R_1 + j\omega L)$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\omega}$	超前
1、3	$U \propto \frac{1}{R_1}$	$R_1 // (R_2 + j\omega L)$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\omega}$	超前
2、3	$U = U_S$	$j\omega L // (R_1 + R_2)$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\omega}$	超前

2.2 R-R-C



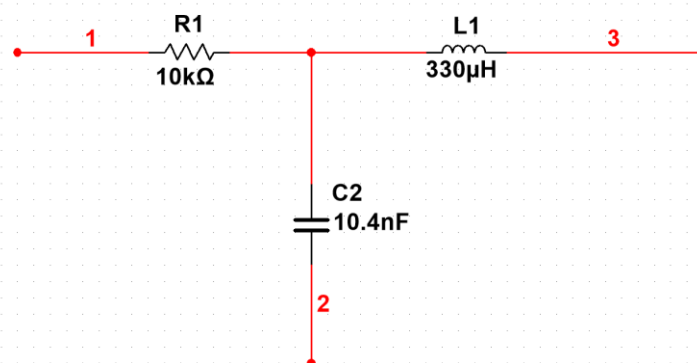
端口	直流特性	交流特性		
		交流阻抗	幅频	相频
1、2	$U \propto \frac{1}{R_2}$	$R_2 // (R_1 + \frac{1}{j\omega C})$	$ \dot{U} \propto \omega$	滞后
1、3	$U \propto \frac{1}{R_1}$	$R_1 // (R_2 + \frac{1}{j\omega C})$	$ \dot{U} \propto \omega$	滞后
2、3	隔断	$\frac{1}{j\omega C} // (R_1 + R_2)$	$ \dot{U} \propto \omega$	滞后

(3) 复习元件参数测量、三电压法测交流阻抗测量、电路频率响应实验的相关内容；

(4) 复习 RLC 串联谐振相关知识及串联判断测量方法；查找资料，了解 RLC 并联谐振相关知识及并联谐振判断测量方法。

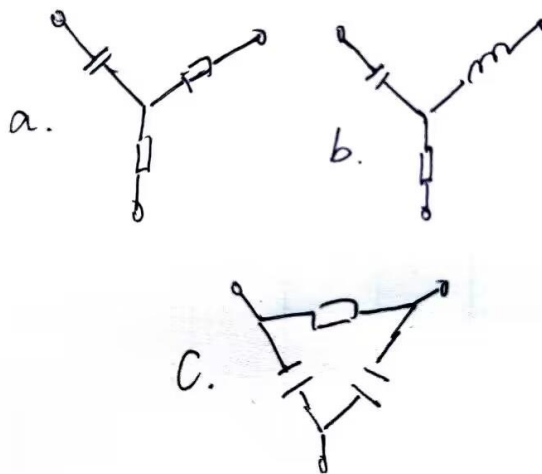
(5) “Y”型连接，假设三个元件分别为 RLC，写出该电路中各元件性质的判断过程和各元件参数计算过程；

如图。



端口	直流特性	交流特性		
		交流阻抗	幅频	相频
1、2	隔断	$1/j\omega C$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}}$	$\tan\theta = -\frac{1/\omega C}{R}$
1、3	$U \propto \frac{1}{R}$	$j\omega L$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$	$\tan\theta = \frac{\omega L}{R}$
2、3	隔断	$\frac{1}{j\omega C} + j\omega L$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L}$	$\theta = \pm 90^\circ$

首先测量直流特性。12、23 端口均隔断，判断为如下三种电路：



随后在测量未隔断支路两端串联已知电阻，并加入交流信号源，测量端口分压波形。

改变频率，若分压改变，可以排除 a 情况。

同时接入信号源波形，若波形相对信号源波形超前，说明阻抗呈感性，可排除情况 c。

即可说明为 RLC 星形连接电路。

测量过程如下。

首先在刚才未隔断支路，即 RL 支路接入直流信号，测出端口电压与电流 U_1 、 I_1 ，可计算出

$$R = \frac{U}{I}$$

随后加入频率为 ω 的交流信号，测出相位偏移 φ ，由

$$\tan\varphi = \frac{\omega L}{R}$$

可得

$$L = \frac{R \tan\varphi}{2\pi f}$$

最后对其余两支路分别施加交流源，改变频率，其中一个支路波形始终超前激励，另一个支路呈现低频滞后、高频超前特性，后者为 LC 支路，前者为 RC 支路。

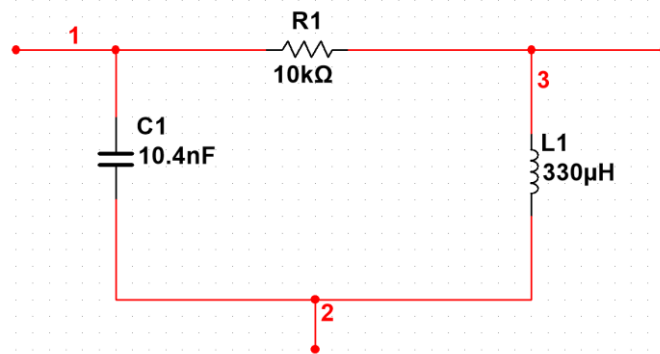
RC 支路串联已知电感 L_0 ，调节频率至万用表电流有最大值，此时支路谐振。记录此时信号源的频率 f_0 ，由

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}}$$

可得

$$C = \frac{1}{L_0} \left(\frac{1}{2\pi f_0} \right)^2$$

(6) “ Δ ”型连接，假设三个元件分别为 RLC，写出该电路中各元件性质的判断过程和各元件参数计算过程。

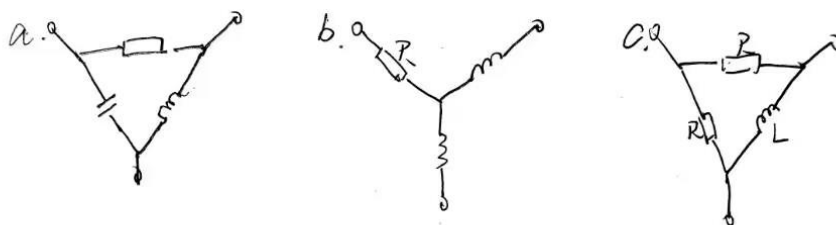


端口	直流特性	交流特性		
		交流阻抗	幅频	相频
1、2	$U \propto \frac{1}{R}$	$\frac{1}{j\omega C} // (R + j\omega L)$	谐振时最大	反相
1、3	$U \propto \frac{1}{R}$	$R // (\frac{1}{j\omega C} + j\omega L)$	$ \dot{U} \propto \frac{1}{R}$	$\theta = 0^\circ$
2、3	$U = U_S$	$j\omega L // (R + \frac{1}{j\omega C})$	谐振时最大	反相

首先测量直流特性。一端口短路（图中 23 端口），其余两端口呈阻性，且根据信号源 U 与所测电流 I 两次得到的两支路电阻有：

$$R_1 = R_2 = R$$

即两支路电阻相等，则判断为如下三种电路：



接下来利用谐振排除与测量。在呈阻性的端口分别接入交流信号源，同时测量电流。图 b、c 所示电路在频率变化时，阻抗均单调改变。而图 a 在改变阻抗时会有谐振点，无论测到的是 $R//LC$ 支路还是 $C//RL$ 支路，其电流均不会单值变化。可利用这点说明为 RLC 三角形连接电路。

在此基础上，具体找到应有某一频率 f ，使得电路谐振。找到使电路串联谐振的特性电路（即电流出现峰值，且曲线与电源同相位），此时该支路为 R 支路，阻值已由直流特性求出。

R 支路串联已知电阻 R_0 ，调节频率至万用表电流有最大值，此时支路谐振。记录此时信号源的频率 f_0 ，由

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}}$$

可得

$$LC = (\frac{1}{2\pi f_0})^2$$

改变频率为 f，此时有

$$Z = R // (\frac{1}{j\omega C} + j\omega L)$$

记录对应电流 I 及其幅角 φ 。应有

$$i = \frac{\dot{U}}{Z}$$

$$\tan\varphi = \frac{-\frac{1}{\omega C} + \omega L}{R}$$

根据上式可利用 Casio 解方程功能解出具体数值。

三、实验内容

已知黑箱电路元件标称值范围：

电阻： $100\ \Omega \sim 1000\ \Omega$ ；电容： $0.001\ \mu\text{F} \sim 0.22\ \mu\text{F}$ ；电感： $0.047\ \text{mH} \sim 0.47\ \text{mH}$

实验要求

(1) 分析电路结构及元件阻抗随频率变化规律，给出解决问题的思路，提出实验方案；

(2) 制定实验计划，明确各步骤中施加激励的方式、激励类型和状态，电路的连接方式，需要测量的参数等；

(3) 根据电路阻抗、电流与电压相位差变化规律，判定元件性质、计算元件参数。

黑箱按如下方式标号。



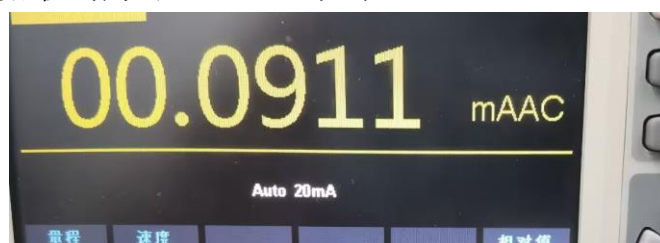
上图是测量直流特性时的连接图，下文不再复制。

1. 电路结构测定

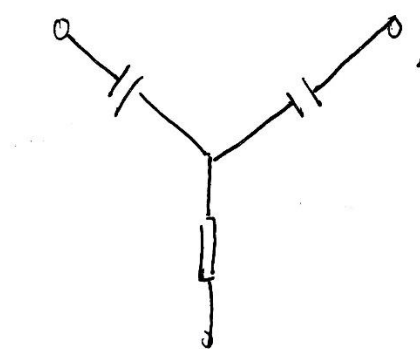
1.1 直流特性

首先测量各端口直流特性。利用信号源在各端口两端加上 5V 直流电压，利用万用表直流电流档检测支路电流值。

发现各端口电流值均为约 0.095mA。如下：

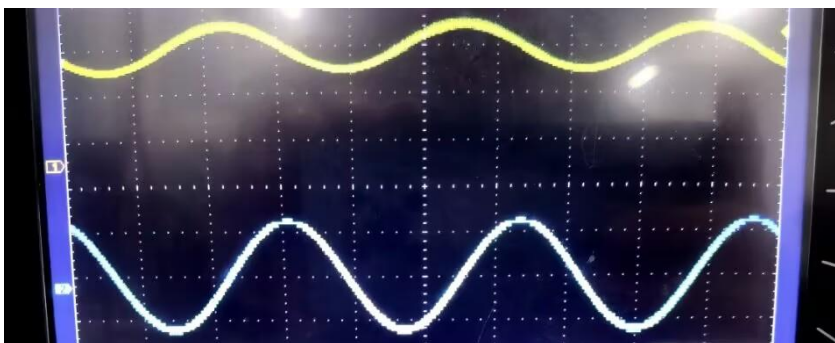


由于将万用表表笔悬空时，电流也约为 0.09mA，判断三条支路的直流特性均为断路。因此，可以直接判断出电路的元器件组合方式：**C-C-R 星形连接**。如下。

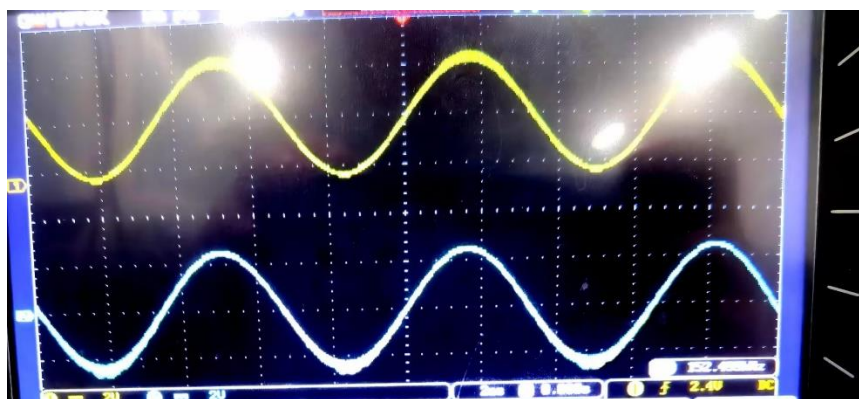


1.2 各元件位置判断

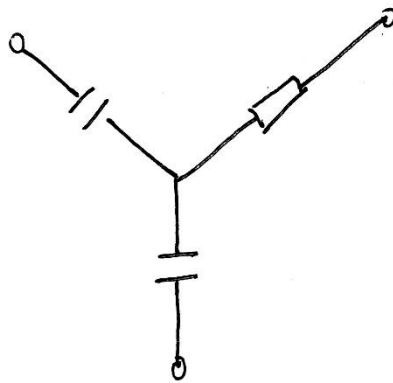
在端口接入交流激励，参数为 $V_{pp}=10V$ ， $f=1kHz$ 。在各支路外串联一已知电容，并测量各端口间电压相位。发现，1、2 端口与 2、3 端口间电压与电源电压存在一定相位差，而 1、3 端口间电压恰好与电源同相。改变频率，继续测量电压波形，相位差维持在 0° 。如图。



上图为 1、2 与 2、3 端电压波形。黄色为端口电压波形，蓝色为电源电压波形。



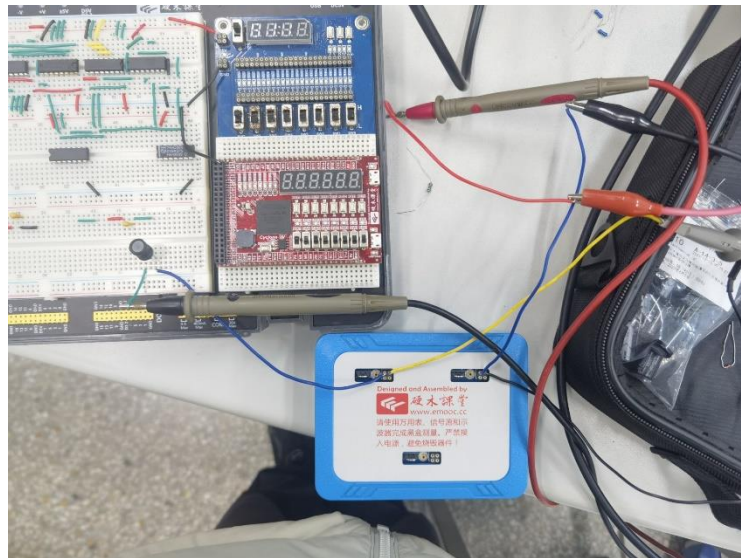
上图为 1、3 端口电压波形。黄色为端口电压波形，蓝色为电源电压波形。这说明：1、3 端间阻抗显纯容性，即 **1、3 端间为两电容**，电路图如下。



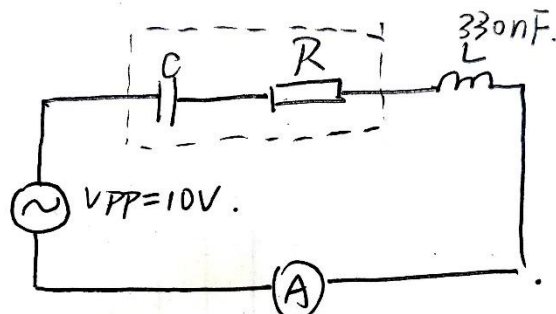
至此，已判断出除参数外的内容。接下来进行具体参数测定。

2. 元件参数测定

参数测定采用了谐振的思路。首先在 1、3 端串联一已知电感（330nH），并在电路两端接入交流信号源，参数 $V_{pp}=10V$ 。用万用表测量电路电流。这时，电路组成串联 RLC 电路，连接图如下。



等效电路图如下。



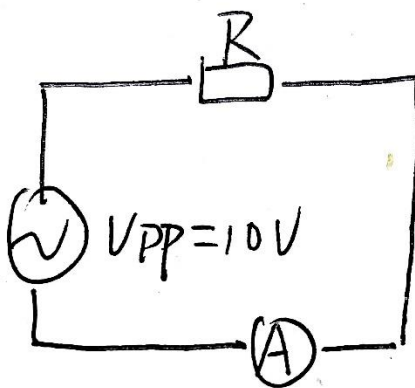
连续调节信号源频率，发现将频率旋到 $f_0 = 4.08kHz$ 附近电流有峰值：

$$I_0 = 4.94mA$$

如图。



记录这两组数据。此时，由于电流有峰值，电路应为串联谐振状态，LC 部分整体等效为短路。因此，此时的等效电路图如下：



因有

$$R = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}I_0} \quad (1)$$

式（1）中分母有 $2\sqrt{2}$ 的原因是 V_{pp} 为峰峰值，除以 2 得到峰值，再除以 $\sqrt{2}$ 得到有效值。万用表电流档显示的结果为有效值，因此需用有效值计算。

又：谐振时的频率 f_0 满足

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

上述两个一元方程可分别解出 R、C。分别代入已知数值，得到

$$\begin{cases} R = 705\Omega \\ C_{1,2} = 46nF \end{cases}$$

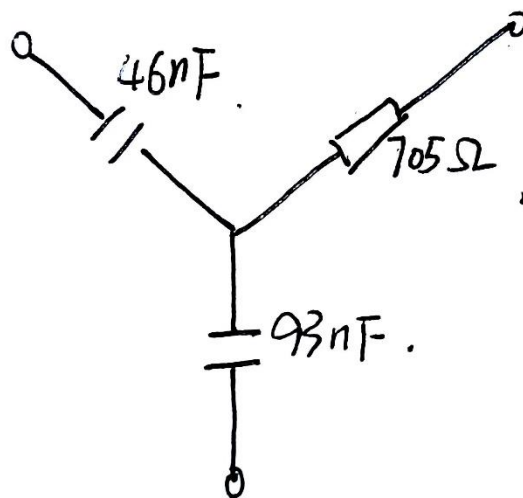
利用同样的方式计算 3 端口的电容 $C_{2,3}$ ，其参数为

$$f_0 = 28.73kHz$$

这里已经得到了 R 的数值，因此不需要记录电流 I。代入式(2)，得到

$$C_{2,3} = 93nF$$

元件参数完成计算，实验所得黑箱电路如图。



四、实验总结

(实验出现的问题及解决方法、思考题(如有)、收获体会等)

这次实验在实验 7 时就做完了。无疑，黑箱的难易程度功不可没，我选的黑箱是 RCC 连接，难度较为简单，因此判断与参数测量都比较快。实验中，思考了多种测量方法，最后选择了串联谐振的方法，并认为该方法比较巧妙。原因如下：

1. 对于两条支路，分别有一个谐振点 f_0 ，因此电阻的测量可以有两个值，通过这种方式能够减小误差。事实上，实验时我在第二条支路也测量了电阻阻值，不过由于相差不是很大，并且该实验对精度要求不高，所以没有计入。

2. 能够用一次实验分别测出 R 与 C 的值。

因此，该方法可行性较高。

本次实验中遇到的最大困难反而在实验后补充预习报告时。这次预习报告我写了 4 个小时，除开编辑公式的时间外，有很大一部分时间花在了三角形连接电路各种情况的分析上。分析三角形连接的 RLC 电路时，我最初并没能分析出具体特性，借助了 multisim 的 AC 分析功能，从而得出结论。并且在具体帮别人分析可能为 RLC 电路的黑箱时，发现由于实际实验时在电流灵敏范围内会产生较大误差，因此预习时设想的方法其实很难进行。在这里提出一种较为麻烦、但精度较高的实验方法：

1. 选取多个频率值，测量对应电流幅值；

2. 利用 origin 处理数据，进行函数模拟。由于我们已知电路的方程，将已知量代入方程得到函数，即可进行含参函数的拟合。

五、参考资料(预习、实验中参考阅读的资料)

电路教学计划 2023